

平成 22年 5月 28日現在

研究種目： 若手研究(B)  
 研究期間： 2008～2009  
 課題番号： 20700179  
 研究課題名(和文) 環境との力学的相互作用に即応するヘビ型ロボットの適応的蛇行運動の実現  
 研究課題名(英文) Adaptive Meandering Locomotion of a Snake-like Robot with Rapid Response to Physical Interaction with Environments  
 研究代表者  
 井上 康介 (INOUE KOUSUKE)  
 茨城大学・工学部・助教  
 研究者番号： 10344839

研究成果の概要(和文)：生物のヘビが示す環境条件への即応的適応のメカニズムを調査し、これを工学応用するため、実験動物を用いた調査とロボットにおける即応反応の再現を通じた調査を行った。実験動物を用いた調査では、摩擦係数の異方性の計測および電子顕微鏡による微細構造の観察から、力学的相互作用に寄与する重要な知見を得た。一方、工学的実装については、ひずみゲージを用いた側方・垂直抗力センサを開発し、環境条件に対する基礎的な反射反応を実現する制御器を実現した。

研究成果の概要(英文)：In order to reveal the mechanisms underlying immediate response to environmental conditions in living snakes and to apply it to artifacts, we investigate the experimental animals and reproduce the phenomena in robots. In investigations using real animals, we obtained some important knowledge related to the interaction between snakes and environments through kinematics measurements, measurement of frictional anisotropy and microscopic observation of abdomen surface using EM. As for engineering application, we developed sensors to measure lateral and vertical reaction force from the environment by the use of strain gauges and achieved a controller to reproduce basic reflection to changing environmental condition.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	700,000	210,000	910,000
2009年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
年度			
総計	1,400,000	420,000	1,820,000

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：情報学，知覚情報処理・知能ロボティクス

キーワード：知能ロボット，生物模倣型ロボット

## 1. 研究開始当初の背景

ヘビは紐状の単純な身体を有しているにも

関わらず、草地、岩場、水上、木の枝など、陸生動物の中でも最も多様な環境に適応して生きている動物である。さらにヘビは状況

に応じて、一般的に見られる蛇行運動の他にもアコーディオン運動や芋虫様運動などの運動モードを切り替え、環境上に存在する石などの障害物に適切に身体を押し当てながら効率の良い運動を実現している。

このようなヘビの高い適応能力を人工物において実現することを目的として、従来多数のヘビ型ロボットが研究されてきた。しかしながら、それらのロボット研究においては、ヘビの紐状の身体という特徴やヘビに観察される周期的な蛇行体型の再現といった表面的な模倣は行われているものの、「なぜ特定の状況においてヘビは特定の運動を発言するのか」に関わるメカニズムを理解して再現することについてはほとんどアプローチされて来なかった。このような、メカニズムへの接近を伴わない方法論に起因して、従来のヘビ型ロボットは環境への適応能力において限定されてきたと言える。

ヘビの運動では、環境との相互作用は主に腹面における環境との力の及ぼしあいとして行われること、およびヘビの長い身体の全体を脳のみで制御しているとは考えにくいことから考えれば、ヘビの環境適応行動メカニズムにおいては、ヘビ腹面が環境から受ける力をフィードバック信号とした脊髄に存在する下位制御系の働きが重要であることが推測される。

生物学におけるヘビの運動メカニズム研究においても、そのロコモーションの力学的・情動的メカニズムは明らかになっておらず、一方で工学においてもヘビを模倣した制御メカニズムが提案されていないことから、このメカニズムを明らかにし、実装することは大きな意義を持つ。

## 2. 研究の目的

- (1) ヘビ型ロボットの腹面における環境との相互作用に即応する運動制御において、環境との力学的相互作用情報を取得可能であり、かつ不整地に適応可能な接地機構の開発
- (2) 上記センシング情報を利用した適応的低次運動制御系の実現

## 3. 研究の方法

上記研究目的を達成するため、まず生物のヘビに関する調査を行う必要があるため、下記の実験・調査を実施した。

まず、障害物のない水平面および障害物のある水平面におけるヘビの運動を測定するため、モーションキャプチャシステムを構築し、運動のキネマティクス計測を行った。実験では水平面上のヘビの運動を2次元平面上の運動として解析した。

次に、ヘビの身体との環境との接触の力学的メカニズムを調査するため、実験動物の解剖を行い、筋肉の配置、腹の鱗周辺の構造を明らかにした。

また、蛇行時に必要となる、体軸方向の抗力が小さく、側方向の抗力が大きくなるという条件を実現するためのメカニズムを調査するための実験を、ミクロ的およびマクロ的観点から行った。

ミクロ的観点に対応して、ヘビの腹面にある大きな鱗である腹鱗の表面の微細構造を電子顕微鏡で観察し、腹鱗上にきわめて微細なトゲが多数並んで配置されていることを観察した。また、そのトゲの配列の方向性が、胴体後方へすべて向かっているのではなく、ある点を中心とした放射状の配置となっていることを明らかにした。

マクロ的観点に関しては、まず、生物のヘビは腹面の両端部分をとがらせて「エッジ」と呼ばれる構造を作ることによって地面との引っかかりを強めているという仮説を検証するため、絨毯環境上での詳細な観察、および水を薄く張ったガラス面上での蛇行の観察を行い、エッジが利用されていることを確認した。

また、同じくマクロ的観点に関連して押しつけ力の分布を計測する実験を行った(図1)。ヘビは蛇行をする際、自重を胴体上に均一に分布させて地面を押しつけるわけではなく、推進力を効率よく生み出すのに適した押しつけ力分布を作っているとされている。そこで、ヘビ腹鱗の左右に1つずつ、薄い圧力センサを取り付け、蛇行時の地面から受ける垂直抗力の体軸方向の分布と左右のバランスを計測した。その結果から、ヘビの蛇行においては、身体が最も屈曲する位置付近ではほとんど地面を押しつけず、反面、変曲点付近では進行方向と逆となる側において強い押しつけを行っていることを明らかにした。

以上の動物実験の結果は、これを工学的に再現する上での材料として有用なものである。

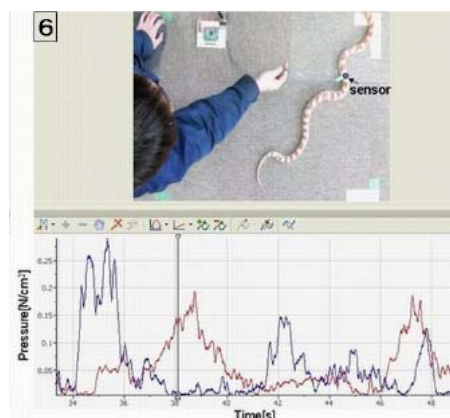


図1：抗力測定結果

一方、工学的な実現に関して、まず重要となるのは、地面との力学的相互作用を計測するセンサである。前述の通り、ヘビの蛇行運動においては胴体の各部位が地面から受ける力（抗力）の大きさが重要な感覚情報となるため、ロボットにおける実現においてもこの情報を取得するハードウェアが必要となる。なお、実験に用いたロボットを図1に示す。

ヘビ型ロボット（図2）においては、体軸方向と側方向において、体軸方向には滑りやすく側方向には滑りにくいという条件が必要となる。一般的なロボットではこの条件を成立させるためのハードウェアとして受動車輪をロボット胴体の下に配置しており、今回我々が用いたロボットでも受動車輪を用いている。そこで、この受動車輪が環境から受ける力を計測するセンサを開発することが必要となる。

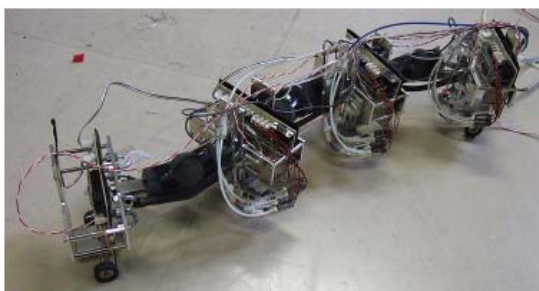


図2：ヘビ型ロボット PAS-1

このため、受動車輪とロボットシャーシの間に図3のような部品を加え、ここにひずみゲージを用いたセンサを配置した接地機構を開発した。センサには受動車輪の搭載部に複合アングル部品を置き、図に示す2つの位置にひずみゲージを配置して、それぞれの部位が受けている曲げモーメントを計測することで、車輪が受ける垂直・水平方向の力を計測する。

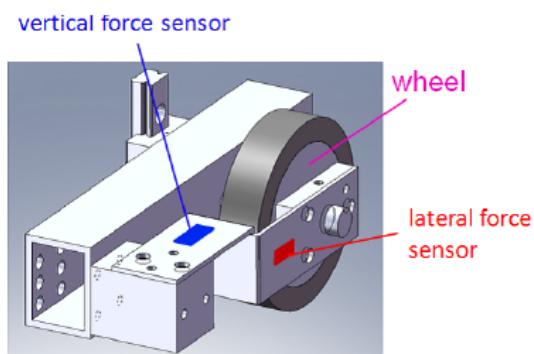


図3：接地力センサ

複合アングルを用いたのは垂直方向・水平方向の力の計測値同士ができるだけ干渉しないためであったが、予備実験の結果、残念ながら多少の干渉が見られた。そこで、詳細なキャリブレーションの結果、2つのセンサ値と2つの力の値の対応関係を同定し、干渉の問題を解決した。

蛇行時のセンサ読取値の例を図4に示す。ロボットの蛇行に伴って、正しく力を読み取れていることが基礎実験により確認された。

上記の生物的知見およびセンサの開発に基づき、生物と同様の適応的運動を実現する運動メカニズムを再現するシステムを開発することが本研究の最終目標であるが、まず基礎的な段階として、反射的運動を実現するシステムを開発した。

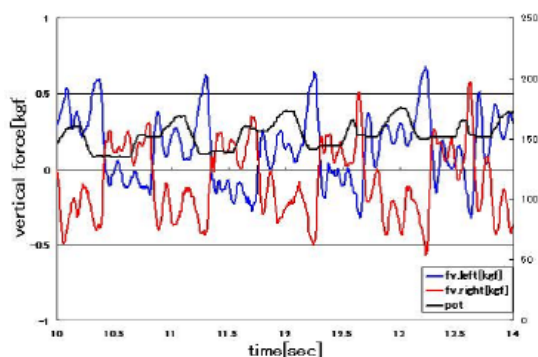


図4：センサ読取値の例

ここでは、細い木の板の上を蛇行するヘビ型ロボットが板の端に到達して落下の危険が生じたことをセンサにより感知し、直ちに運動を停止するというタスクを与え、実験を行ってこのタスクが達成可能であることを確認した。

つづいて、環境上の凹凸にヘビが適切な位置で胴体を押しつけて効率よく前進する行動を再現するためのシステムの構築に取り組んだ。しかしながら、このタスクを実現するには、脊髓レベルの下位運動制御系だけでは不十分であり、ヘビが現在どの方向に向かっているかという情報が必要となることが明らかとなった。そこで、ヘビに方向の情報を関知させるためのセンサ系、および方向の情報も利用して動くための制御系の開発に取り組んだが、残念ながらこの作業は研究期間内に完了しなかった。

#### 4. 研究成果

- (1) ヘビ腹鱗上の微細構造の存在はすでに報告されていたが、その配置の方向性について、世界的にまだ報告されていない事実（放射状に配置されていること）を明

- らかにした。
- (2) ヘビの蛇行時に地面への押しつけ力がどのように制御されているかに関する詳細な力学的データを世界に先駆けて計測した。
  - (3) ヘビ型ロボット腹面が環境から受ける垂直・側方抗力を詳細・正確に計測できるセンサを開発した。
  - (4) ヘビが環境から受ける力に即応して反射的に行動するシステムを開発した。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計1件)

- ① 井上康介：ヘビの適応運動メカニズムの構成論的理解，雑誌名：計測と制御，48巻9号，pp.699-704，(2009/09) (査読なし)

〔学会発表〕(計5件)

- ① 西部 達矢，井上 康介：ヘビ型ロボットによる地面との相互作用に即応する適応的運動制御，計測自動制御学会 第22回自律分散システム・シンポジウム資料，pp.53-56，(2010/01/22，名古屋大)
- ② Tatsuya NISHIBE，Kousuke INOUE：Adaptive Control of a Snake-like Robot Interact with Ground Surface，Proc. 5th International Student Conference at Ibaraki University，pp.51-52，(2009/11/01，茨城大)
- ③ 西部 達也，井上 康介：環境との力学的相互作用に即応する適応的ヘビ型ロボット，第27回日本ロボット学会学術講演会予稿集，2F1-01，(2009/09/16，横国大)
- ④ Kaita NAKAMURA，Wataru YOSHINAGA，Kousuke INOUE：Development of a Biomimetic control system for a Snake-like Robot with Pneumatic Actuators，Proc. 4th International Student Conference at Ibaraki University (ISCIU2008)，pp.66-72，(2008/11/05，茨城大)
- ⑤ 中村 海太，吉永 航，井上 康介：空気圧アクチュエータを用いたヘビ型ロボットのための生物模倣型制御系の開発，第26回日本ロボット学会学術講演会予稿集，202-03，(2008/09/10，神戸大)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

井上 康介 (INOUE KOUSUKE)  
茨城大学・工学部・助教